

Evaluation and Analysis of Risks of Tanks Containing Flammable Substances in Shiraz Petrochemical Company Using Bow-tie Model

Behnam Saruei

M.Sc., Dep. of Environmental Science, College of Basic Sciences and Modern Technologies, Electronic Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Soheil Sobhanardakani

* Professor, Dept. of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran. (Corresponding Author) s_sobhan@iauh.ac.ir

Seyed Ali Jozi

Professor, Dept. of the Environment, College of Marine Science and Technology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

Background and Purpose: Considering the ever-increasing expansion of petrochemical industries in Iran and the high capacity of accidents such as fire and explosion in these industries, this study was conducted to evaluate and analyze the risks of tanks containing flammable substances in Shiraz Petrochemical Company using bow-tie model.

Materials & Methods: In the current study, the statistical population included: managers, experts, and employees of Shiraz Petrochemical Company, who evaluated and analyzed the risk of tanks containing flammable substances using the bow-tie model based on the checklist. Also, the collected data were processed using Bow TieXP software version 12.02.

Results: Based on the results obtained, among the 233 preventive and reducing obstacles, 193 cases, i.e. 82.8%, were related to the behavioral factor. Three cases equal to 1.29% related to active hardware factors, 20 cases equal to 8.58% related to technical-social factors, 12 cases equal to 5.15% related to continuous hardware factors and five cases equal to 2.15% were related to passive hardware factors. Therefore, behavioral factors had the highest amount of preventive and reducing barriers and had a significant difference with other factors also.

Conclusion: Increasing the awareness of the humans working in the maintenance and care of tanks containing flammable substances division could be a suitable solution for managers to increase the safety level of these departments. This confirms the need to change and improve the attitude, reform the structure, and plan effective and efficient training in this field that does not involve high direct costs and at the same time has a good chance of returning capital.

Keywords: Risk assessment, Bow-tie model, Shiraz Petrochemical Company, Flammable substances, Iran

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

► **Citation:** Saruei B, Sobhanardakani S, Jozi S.A. Evaluation and Analysis of Risks of Tanks Containing Flammable Substances in Shiraz Petrochemical Company Using Bow-tie Model. *Journal of Research in Environmental Health*. 10(3):39-51.

Received: 2024/03/23

Accepted: 2024/09/09

Doi:10.22038/jreh.2024.25291

ارزیابی ریسک حوادث مخازن حاوی مواد اشتعال‌زا در پتروشیمی شیراز با استفاده از روش پاپیونی (Bow-tie)

بهنام ساروئی

کارشناس ارشد مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست، گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه و فن‌آوری‌های نوین، واحد الکترونیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

سهیل سبحان اردکانی

* استاد گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. (نویسنده مسئول)

s_sobhan@iauh.ac.ir

سیدعلی جوزی

استاد گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون دریایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

زمینه و هدف: نظر به گسترش روزافزون صنایع پتروشیمی در ایران و ظرفیت بالای بروز حوادثی هم‌چون آتش‌سوزی و انفجار در این صنایع، این پژوهش با هدف ارزیابی ریسک حوادث مخازن حاوی مواد اشتعال‌زا در پتروشیمی شیراز با استفاده از روش پاپیونی (Bow-tie) انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، جامعه آماری شامل: مدیران، کارشناسان و کارمندیهای پتروشیمی شیراز بود که با استفاده از روش پاپیونی و براساس چک‌لیست نسبت به ارزیابی و تحلیل ریسک مخازن حاوی مواد اشتعال‌زا در پتروشیمی شیراز اقدام کردند. از طرفی، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Bow Tie XP پردازش شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که از مجموع ۲۳۳ مورد موانع پیشگیرانه و کاهنده، ۱۹۳ مورد معادل ۸۲/۸ درصد مربوط به عامل رفتاری بوده است. سه مورد معادل ۱/۲۹ درصد مربوط به عوامل سخت‌افزار فعال، ۲۰ مورد معادل ۸/۵۸ درصد مربوط به عوامل فنی-اجتماعی، ۱۲ مورد معادل ۵/۱۵ درصد مربوط به عوامل سخت‌افزار پیوسته و پنج مورد معادل ۲/۱۵ درصد نیز مربوط به عوامل سخت‌افزار غیرفعال بوده است. لذا، عوامل رفتاری از بیش‌ترین میزان موانع پیشگیرانه و کاهنده برخوردار بوده و اختلاف فاحشی با سایر عوامل داشت.

نتیجه‌گیری: افزایش آگاهی نیروی انسانی شاغل در واحدهای نگهداری و مراقبت از مخازن حاوی مواد اشتعال‌زا، می‌تواند راهکار مناسبی برای مدیران در راستای ارتقای سطح ایمنی این بخش‌ها باشد که این موضوع موید لزوم تغییر و ارتقا نگرش، اصلاح ساختار و برنامه‌ریزی آموزش‌های اثربخش و موثر در این حوزه است که هزینه‌های مستقیم بالایی نیز در پی نداشته، و در عین‌حال از شانس بازگشت سرمایه خوبی نیز برخوردار است.

کلید واژه‌ها: ارزیابی ریسک، روش پاپیونی، پتروشیمی شیراز، مواد اشتعال‌زا، ایران

◀ **استناد:** ساروئی ب، سبحان اردکانی س، جوزی س.ع. ارزیابی ریسک حوادث مخازن حاوی مواد اشتعال‌زا در پتروشیمی شیراز با استفاده از روش پاپیونی (Bow-tie). فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. پاییز ۱۴۰۳؛ ۱۰(۳): ۳۹-۵۱.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹

نوع مقاله: پژوهشی

مقدمه

حوادث عمده مانند آتش‌سوزی، انفجار و انتشار مواد شیمیایی سمی ناشی از تولید، ذخیره، حمل‌ونقل، استفاده و دفع مواد شیمیایی بالقوه خطرناک که منجر به تلفات جانی، آسیب به محیط‌زیست و همچنین تأسیسات می‌شوند، از مهم‌ترین تهدیدهای صنایع فرآیندی محسوب می‌شوند (۱). در بین صنایع فرآیندی، تأسیسات پتروشیمی به دلیل ماهیت قابل اشتعال مواد فرآوری‌شده، شرایط عملیاتی و شدت پیامدهای ناشی از وقوع حوادث از اهمیت بسیار زیادی برخوردارند (۲، ۳). لذا، گسترش صنایع پتروشیمی و افزایش حوادث در این صنعت به‌ویژه توجه به نقش خطای انسانی در بروز حوادث صنایع فرآیندی شیمیایی لزوم توجه به راه‌کارهایی برای شناسایی و کنترل عوامل حادثه‌ساز و ریسک‌های محیط کاری را بیش از پیش آشکار می‌سازد (۴). گزارش شده است که عامل بیش‌تر از ۸۰ درصد حوادث در صنایع مختلف ناشی از خطای کار است که این، اهمیت عامل انسان و خطاهای انسانی را نشان می‌دهد (۵، ۶).

محققین مختلف تقسیم‌بندی‌های گوناگونی را درباره‌ی دلایل و عوامل مؤثر در بروز ریسک‌ها در محیط کاری صنایع پتروشیمی ارائه کرده‌اند. برای مثال، ولش و همکاران (۲۰۲۳) اصلی‌ترین دلایل را با پیچیدگی، تنش، خستگی، آموزش و تجربه مرتبط دانستند (۷). در یک طبقه‌بندی دیگر که توسط کیروان و همکاران (۲۰۱۳) ارائه شد، زمان، کنترل‌گرها و نشان‌گرها، آموزش و تجربه، دستورالعمل‌ها، سازمان‌دهی وظایف و پیچیدگی وظیفه به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در بروز ریسک محیط کاری صنایع پتروشیمی معرفی شدند (۸).

در خصوص ارزیابی ریسک محیط کار چندین پژوهش در ایران و سایر کشورها انجام یافته است که ازجمله می‌توان به پژوهش‌های بات (۲۰۲۴) که نسبت به ارزیابی ریسک شغلی در صنایع شیمیایی با استفاده از روش پاپیونی اقدام کرد (۹)، عبادزاده و همکاران (۲۰۲۳) که در آن نسبت به ارزیابی ریسک محیط‌زیستی صنعت پتروشیمی با تلفیق مدل پاپیونی و روش ارزیابی نقاط شکست و اثرات محیط‌زیستی^۱ اقدام شد (۱۰)، وو و همکاران (۲۰۲۳) که

نسبت به آرایه یک روش نوین ارزیابی ریسک پویا برای پتروشیمی آرامیس با استفاده از تحلیل پاپیونی و روش تحلیل شبکه بیزی اقدام کردند (۱۱)، ذوالفقاری و همکاران (۲۰۲۳) که با ارزیابی ریسک نیمه کمی مواجهه بهداشتی با ترکیبات آلی فرار در جایگاه‌های توزیع سوخت بنزین شهر سبزوار گزارش کردند نصب سیستم بازیافت بخارات، کنترل ریسک‌ها در منبع و جایگزینی مواد خطرناک با مواد بی‌خطر یا کم‌خطر، به‌میزان قابل‌توجهی به کاهش ریسک مواجهه نیروی شاغل در جایگاه‌ها با این ترکیبات منجر می‌شود (۱۲)، میهن‌پرست (۲۰۲۱) گزارش کردند کارمندان در بسیاری از شرکت‌های زیرمجموعه‌ی صنعت نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی از مقررات لازم بهبوددهنده‌ی فرهنگ ایمنی و کاهش‌دهنده‌ی حوادث ایمنی آگاهی ندارند (۱)، شریعت‌مداری و نهاوندی (۲۰۲۰) که گزارش کردند روش منطق‌شهودی علاوه بر ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌های شناسایی شده، به ارزیابی سطح شناخت از ریسک‌ها در پروژه‌های ساخت هلدینگ پتروشیمی باختر نیز منجر شده است (۱۳)، کریمی و همکاران (۲۰۱۹) که با ارزیابی خطاهای انسانی مربوط به بردمن در یکی از اتاق‌های کنترل صنایع پتروشیمی با استفاده از روش پردازش خطا با تأکید بر قابلیت اطمینان‌شناختی انسان^۲ نتیجه گرفتند که بیش‌ترین سبک کنترلی برای بردمن و بردمن ارشد به‌دست آمده از شبکه بیزین مربوط به کنترل راهبردی و اتفاقی با احتمال خطای انسانی بوده است (۱۴)، بالیست و همکاران (۲۰۱۸) که نسبت به ارزیابی مهم‌ترین ریسک‌های محیط‌زیستی واحد بهره‌برداری پالایشگاه نفت خام گچساران اقدام کردند (۱۵)، حلوانی و همکاران (۲۰۱۷) که آموزش کارمندان و تدوین دستورالعمل‌های کاری برای نظارت و بازرسی دقیق کارورها و اقدام مناسب در صورت بروز نقص در اتاق کنترل را برای کاهش خطاهایی رخ داده در اتاق کنترل شرکت پالایش گاز پارسیان شهرستان مَهر و محدود کردن پیامدهای ناشی از آن‌ها توصیه کردند (۱۶)، رضائیان و همکاران (۲۰۱۷) که پیشگیری از ریزش و پخش مواد روغنی و قابل اشتعال و انتقال مواد ریخته‌شده به واحد تصفیه و همچنین استفاده از حفاظ‌ها و وسایل حفاظت

^۲ Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)

^۱ Environmental Failure Mode and Effects Analysis (EFMEA)

روش کار

معرفی صنعت مورد مطالعه

شرکت پتروشیمی شیراز به عنوان اولین واحد تولیدی صنایع پتروشیمی ایران در سال ۱۳۴۲ و به منظور تولید کودهای شیمیایی از ته آغاز به فعالیت کرد. این شرکت در ۴۵ کیلومتری شهر شیراز، در مجاورت رودخانه کر و در نزدیکی مرودشت واقع شده است. وسعت شرکت ۶۹۲ هکتار است که از این مقدار ۲۰۲ هکتار آن را محوطه‌ی صنعتی تشکیل می‌دهد. از مهم‌ترین واحدهای فعال این شرکت می‌توان به واحد تولید آمونیاک، واحد تولید اوره، واحد تولید اسید نیتریک و واحد تولید نیترات آمونیوم اشاره کرد و در حال حاضر ۸۵۰ نفر در این شرکت اشتغال دارند (۲۱). نقشه هوایی موقعیت استقرار شرکت پتروشیمی شیراز در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نقشه هوایی موقعیت استقرار شرکت پتروشیمی شیراز

روش و ابزار گردآوری اطلاعات

برای گردآوری اطلاعات از دو روش عمده، یعنی مطالعه‌ی کتابخانه‌ای و بررسی‌های میدانی استفاده شد. بدین صورت که برای مطالعه‌ی زمینه‌ی پروژه و گردآوری اطلاعاتی مانند ریسک، ریسک محیط کاری، ریسک‌های مربوط به پتروشیمی و نظایر آن از مطالعه‌ی کتابخانه‌ای، و برای ارزیابی و تحلیل ریسک محیط کاری در پتروشیمی شیراز از چک‌لیست روش پاپیونی استفاده شد که در جدول ۱ نشان داده شده است.

فردی را برای کنترل و کاهش ریسک‌های پتروشیمی شمال غرب کشور توصیه کردند (۱۷)، اژدري و همکاران (۲۰۱۷) که افزایش اثربخشی آموزش کارمندا و بهبود نظارت بر عملکرد آن‌ها را مهم‌ترین عوامل در کاهش وقوع رویدادهای ناشی از خطای انسانی در عملیات‌های تعمیر و نگهداشت پتروشیمی معرفی کردند (۴)، یو و همکاران (۲۰۲۴) که استفاده از تحلیل پاپیونی و روش تحلیل شبکه بیزی را در شناسایی و تصمیم‌گیری مدیریت ریسک و اجرای راهبردهای پیشگیرانه پشتیبانی مؤثر دانستند (۱۸)، سایندها و ویجی بابو (۲۰۲۰) که شناسایی ریسک در صنعت پتروشیمی را برای سیاست‌گذاری، تصمیم‌گیری و همچنین کاهش هزینه عملیاتی بسیار حیاتی دانستند (۲)؛ و همچنین، لی و همکاران (۲۰۱۶) که نسبت به ارزیابی حوادث در صنایع شیمیایی کره جنوبی اقدام کردند (۱۹)، اشاره کرد.

شناسایی خطر، ارزیابی و مدیریت ریسک، نقش مهمی در کاهش خطرات احتمالی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی دارند (۲۰). با توسعه صنایع و رشد فناوری، مسئله ریسک در صنعت و تنوع خطرات به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. با توجه به این‌که پالایشگاه‌ها، خطوط انتقال، شبکه‌های نفت و گاز و مجتمع‌های پتروشیمی به‌عنوان زیرساخت‌های مهم و اساسی به‌شمار می‌روند، این صنایع همواره در کانون توجه متخصصین و دست‌اندرکاران ایمنی بوده و تلاش‌های گسترده‌ای در راستای ایمنی بیش‌تر این صنعت در جهان صورت گرفته است. به‌علاوه، در چند دهه اخیر وقوع حوادث هولناکی مانند سوسو ایتالیا (۱۹۷۶)، بوپال هند (۱۹۸۴)، فلکسیپرو انگلستان (۱۹۸۹)، ضرورت توجه به ریسک‌های موجود در این صنایع را دوچندان کرده است. همچنین، نظر به گسترش روزافزون صنایع پتروشیمی در ایران و ظرفیت بالای رخداد حوادثی هم‌چون آتش‌سوزی و انفجار در این صنایع، با یک نگاه تخصصی و جامع محور بر همه حوادث در می‌یابیم مبنای ایجاد فرآیند حادثه، فقدان یا نقص یک سیستم جامع و یکپارچه ایمنی بوده است. از این‌رو، انجام پژوهش در زمینه ارزیابی و تحلیل ریسک محیط کاری در صنایع پتروشیمی ضروری به‌نظر می‌رسد. بنابراین، با توجه به اهمیت موضوع، این پژوهش با هدف ارزیابی ریسک حوادث مخازن حاوی مواد اشتعال‌زا در پتروشیمی شیراز با استفاده از روش پاپیونی (Bow-tie) انجام یافت.

جدول ۱. پرسش نامه تحقیق

پیشنهادها ^۱	پادمان‌ها ^۲ (موانع و وسایل حفاظتی)	پیامدها ^۳	علل ^۴
------------------------	---	----------------------	------------------

جامعه‌ی آماری و روش نمونه‌گیری

جامعه آماری پژوهش شامل ۳۰ نفر از مدیران ارشد، کارشناس‌ها و کارمندی‌های با تجربه و متخصص شاغل در بخش مدیریت و نگهداشت مخازن حاوی مواد اشتعال‌زا در پتروشیمی شیراز بودند که با استفاده از روش نمونه‌گیری در دسترس انتخاب شدند.

روش و ابزار پردازش داده‌ها

در این پژوهش، برای ارزیابی ریسک حوادث مخازن حاوی مواد اشتعال‌زا در پتروشیمی شیراز از روش پاپیونی استفاده شد. این روش در مقایسه با سایر روش‌های ارزیابی ریسک محیط‌های کاری از جمله تجزیه و تحلیل حوادث شغلی^۵، تجزیه و تحلیل درخت رویداد حوادث شغلی^۶، پردازش درخت خطا^۷، FMEA، ردیابی انرژی و پردازش موانع^۸ و ویلیام فاین^۹ منجر به ایجاد درک واقعی‌تر از ارتباط بین عوامل تأثیرگذار در وقوع ریسک‌های ایمنی، پیامدهای آن و موانع در برابر بروز حادثه در هر مرحله می‌شود. بدین صورت که در این روش، با طراحی یک دیاگرام پاپیونی برای یک فرآیند مشخص، مستندسازی لازم انجام می‌شود و این فرآیند باید به شکل مداوم انجام شود. دومین اقدام نیز ارزیابی ریسک و تصمیم در ارتباط با اقدامات اصلاحی لازم برای کنترل آن‌هاست (۲۲).

از طرفی، در روش پاپیونی باید به این پرسش پاسخ داده شود که آیا کارمندی‌ها در صورت وقوع ریسک‌های ایمنی می‌دانند و آگاه می‌شوند که ریسک حادثه شده چه پیامدهایی دارد و چگونه می‌توان پیامدهای آن را کنترل کرد تا از ضرر و خسارات بیش‌تر پیش‌گیری شود؟ (۲۰). لذا، نکته‌ی مهم در روش بوتای این است که به‌طور مداوم این سوال باید مطرح شود که چه اقداماتی باید انجام داد تا از بروز ریسک‌های ایمنی و پیامدهای حاصل از آن پیش‌گیری شود؟ نکته‌ی دیگر این است که با طراحی دیاگرام پاپیونی

برای یک فرآیند معین، همه‌ی کارمندی‌ها در محیط کار به‌ویژه افراد درگیر با فرآیند مربوطه، به‌طور کامل از وظایف خود در ارتباط با یک ریسک ایمنی مشخص و شیوه‌ی وقوع حادثه و پیامدهای ناشی از آن آگاه شده و همچنین از مسئولیت‌هایشان شناخت پیدا می‌کنند. به این صورت که در یک فرآیند معین، طراح فرآیند می‌داند چگونه باید تدابیر لازم در ارتباط با یک ریسک را در طراحی فرآیند لحاظ کند و همچنین افراد مسئول نیز از وظایف‌شان و نحوه‌ی انجام آن آگاه هستند (۲۳). به‌طور کلی، وقتی یک ریسک مشخص شناسایی می‌شود، می‌توان با روش دیاگرام پاپیونی نسبت به ارزیابی بهتر ریسک در قالب یک چارچوب مشخص برای نشان دادن کنترل موثر خطرات استفاده شود (۱۰).

در این پژوهش، برای اجرای روش پاپیونی به‌ترتیب نسبت به اجرای گام‌های اصلی شامل: شناسایی، ارزیابی، کنترل و بازیابی اقدام شد که گام شناسایی، خود شناسایی تهدیدها، شناسایی کنترل‌ها، شناسایی عوامل تشدیدکننده در شکست کنترل‌ها، شناسایی پیامدها، شناسایی اقدامات بازیابی، شناسایی شکست اقدامات بازیابی، شناسایی کنترل شکست اقدامات بازیابی را شامل شد (۲۰). به‌طور کلی در اجرای این پژوهش، ابتدا اطلاعات دقیقی مانند چیدمان سیستم و شرایط کار در شرکت جمع‌آوری شد، و تجهیزات و همچنین مواد ذخیره در مخازن و یا انتقال‌یافته از آن‌ها ارزیابی شدند (۱۱). از آن‌جا که روش پاپیونی طبق تفکر مبتنی بر موانع شکل می‌گیرد؛ لذا، در این روش، از موانع و کنترل‌کننده‌ها استفاده شد. در این خصوص، دسته‌بندی موانع برای کاهش احتمال وقوع و شدت پیامدهای حاصل از رویداد اصلی با بهره‌گیری از دانش خبرگان واحد ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست^{۱۰} شرکت در حوزه‌های مهندسی فرآیند و واحد نگهداری و تعمیرات با توجه به جنس نرم‌افزاری، سخت‌افزاری و انسانی در پنج گروه به‌شرح مندرج در جدول ۲ دسته‌بندی شدند.

^۶ Occupational Accident Tree Analysis (OATA) Technique

^۷ Fault Tree Analysis (FTA)

^۸ Energy Trace and Barrier Analysis (ETBA)

^۹ William Fine Method

^{۱۰} Health, Safety & Environment (HSE)

^۱ Recommendations

^۲ Safeguards

^۳ Consequences

^۴ Causes

^۵ Occupational Accident Component Analysis (OACA) Technique

در نهایت نیز برای پردازش داده‌ها از نسخه ۱۲/۰۲ نرم‌افزار Bow TieXP استفاده شد.

جدول ۲. دسته‌بندی موانع در روش پایبونی

موانع	مثال‌ها
رفتاری ^۱	آموزش صحیح و موثر (کمک‌های اولیه، واکنش در شرایط اضطراری و ...)، انجام دستورالعمل واکنش در شرایط اضطراری، انجام مانورهای دوره‌ای و غیر اعلام شده، مجوز کار، بازبینی اثربخشی نرم‌افزاری، بازبینی در زمان طراحی، بازدید و اطمینان از عملکرد، قرارداد تامین متناسب، بیمه سازمان، پیگیری دستورالعمل اجرایی نگهداری و بازرسی، جذب افراد بر اساس دستورالعمل منابع انسانی، دستورالعمل تشویق و تنبیه، دستورالعمل جذب و تامین تیم حفاظت، دستورالعمل دسترسی‌ها و صدور مجوز ورود به مناطق و نظایر آن
فنی-اجتماعی ^۲	سیستم امنیت اطلاعات و ارتباطات (ICSS)، سیستم‌های مبارزه با حریق خودکار و دستی، تمهید راه‌های فرار و تجمع ایمن، تجهیزات حفاظت فردی مناسب (PPE)، رعایت الزامات طراحی پدافند غیرعامل، مشخصه نهایی مانند هشدار سطح بالای مایع در مخزن، سامانه‌های اطلاع‌رسانی، سیستم درمانی مجهز و آماده و نظایر آن
سخت افزار فعال ^۳	سیستم‌های ابزار دقیق ایمنی، شیر ایمنی مربوطه
سخت افزار پیوسته ^۴	هشدار سطح مربوطه، مشخصه نهایی مانند هشدار سطح بالای مایع در مخزن، شیر قطع اضطراری مربوطه، سامانه‌های تشخیص گاز و حریق، تجهیزات آشکارسازی و اعلان حریق، سیستم دوربین مداربسته، سیستم‌های محافظت از خوردگی، محافظ‌های صاعقه، محافظ اضافه بار الکتریکی و نظایر آن
سخت افزار غیرفعال ^۵	بدنه تاب‌آور و سالم، حوضچه، حصار و دیواره‌های متناسب، محافظ‌های سیل

یافته‌ها

نتایج مربوط به شناسایی ریسک‌ها و خطرات مخازن

پتروشیمی شیراز

نتایج مرتبط با شناسایی ریسک‌ها و خطرات مخازن پتروشیمی شیراز در جدول ۳ آورده شده است.

نتایج مندرج در جدول ۳ بیان‌گر آن است که ریسک‌های در گره مخزن، ریسک‌هایی با رتبه بالا بوده و ریسک‌هایی که می‌توانند موجب توقف تولید و کسب‌وکار شوند، یکسان و مشابه هستند.

³ Active Hardware
⁴ Continuous Hardware
⁵ Passive Hardware

¹ Behavioural
² Socio Technical

جدول ۳. نتایج مربوط به شناسایی ریسکها و خطرات مخازن پتروشیمی شیراز

اقدام	پیامدها	موانع و وسایل حفاظتی	پیشنهادهای
خرابی یا ترک پوستر پمپ نفت خام	کاهش جریان به خط لوله صادرات، همچنین آسیب به پمپ انتقال خام به دلیل از دست دادن مکش	هشدار سطح جریان سیستم اندازه گیری نفت توقف سیستم و ورودی و خروجی ها هشدار خرابی پمپ پمپ اضطراری	استفاده از هشدار یا پمپ های اضطراری
		افزایش سطح مایعات در مخزن	
خرابی یا قطع شدن پمپ انتقال نفت خام	کاهش جریان در خط لوله خروجی، همچنین احتمال آسیب به پمپ تقویت کننده نفت خام به دلیل مسدود شدن خروجی	هشدار سطح جریان هشدار فشار بالا هشدار فشار بالا هشدار خرابی پمپ استفاده از پمپ آماده به کار پکیج اندازه گیری نفت	جلوگیری از انحراف سطح بالا در نظر گرفتن حداقل دبی هر پمپ با توجه به شرایط عملیاتی
		افزایش سطح مایع در مخزن (انحراف سطح بالا)	
خرابی شیر جریان (یا تجهیزات وابسته به آن) و یا بسته شدن آن	کاهش جریان به خط لوله خروجی، همچنین احتمال آسیب به پمپ تقویت کننده / انتقال خام به دلیل مسدود شدن خروجی	هشدار سطح جریان توقف سیستم و ورودی و خروجی ها پکیج اندازه گیری نفت مشخص کردن حداقل میزان جریان هشدار فشار بالا هشدار جریان بالا	استفاده از هشدار و وسایل اندازه گیری
		افزایش مقدار فشار در مخزن تولید و انحراف سطح بالا	
شیر یاز بسته دور زدن پیچ لایچر	کاهش جریان به خط لوله خروجی، همچنین احتمال آسیب به پمپ تقویت کننده / انتقال خام به دلیل مسدود شدن خروجی	هشدار سطح جریان توقف سیستم و ورودی و خروجی ها پکیج اندازه گیری نفت مشخص کردن حداقل میزان جریان هشدار فشار بالا هشدار جریان بالا	استفاده از هشدار و وسایل اندازه گیری
		افزایش سطح در مخزن تولید و انحراف سطح بالا	
بسته شدن هر شیر دستی در اثر خرابی یا خطا	کاهش جریان به خط لوله خروجی، همچنین احتمال آسیب به پمپ تقویت کننده / انتقال خام به دلیل مسدود شدن خروجی	هشدار فشار بالا هشدار جریان بالا	توجه به محل دریچه و اقدامات حفاظتی
		افزایش سطح در مخزن تولید و انحراف سطح بالا	
خرابی شیر جریان یا هر عنصر در سیستم کنترل آن و یا ز شدن بیش تر آن	کاهش جریان به خط لوله خروجی، همچنین، آسیب به پمپ انتقال خام به دلیل از دست دادن مکش	هشدار سطح بالای جریان هشدار سطح پایین جریان هشدار فشار بالا پکیج اندازه گیری نفت هشدار فشار بالا توقف سیستم و ورودی و خروجی	استفاده از هشدار و وسایل اندازه گیری
		افزایش سطح در مخزن تولید و انحراف سطح بالا	
بسته شدن صافی	احتمال آسیب به پمپ پوستر / ترانسفر خام به دلیل از دست دادن مکش	هشدار فشار بالا در پمپ ها هشدار برای خاموش کردن پمپ تقویت کننده جریان نفت خام هشدار برای خاموش کردن پمپ انتقال جریان نفت خام	استفاده از هشدارها
		افزایش سطح مخزن تولید و انحراف سطح پایین	
کاهش سطح مخزن تولید و انحراف سطح پایین	کاهش جریان به خط لوله خروجی، همچنین آسیب به پمپ انتقال خام به دلیل از دست دادن مکش	هشدار سطح جریان هشدار برای خاموش کردن پمپ های انتقال خام پکیج اندازه گیری نفت هشدار فشار بالا هشدار سطح جریان توقف سیستم ورودی و خروجی	استفاده از هشدارها
		افزایش فشار در مخزن تولید	
کاهش دما از بالا دست به گره	کاهش فشار در مخزن تولید	هشدار جریان بالا	استفاده از هشدارها
		هشدار فشار پایین	
یا ز نشدن شیر کنترل فشار	احتمال آسیب دیدن مخزن در اثر فشار بیش از حد	شیر کنترل فشار، فشار اضافی را از طریق فلر آزاد می کند. هشدار فشار بالا	نصب شیر توقف در فشار بالا در مخزن
		عدم بسته شدن بیش تر شیر کنترل فشار هنگام تنفس مخزن یا پر شدن مخزن در حین توقف خروجی	
آتش سوزی	امکان آسیب دیدن مخزن و تجهیزات	نصب شیر توقف در فشار بالا در مخزن سیستم هشدار جریان توقف سیستم ورودی و خروجی	حفاظت و ایمنی کافی مانند: نصب شیر توقف و کنترل در فشار بالا در مخزن، دریچه انفجار و نظایر آن برای مخزن تولید در صورت آتش سوزی بررسی شود.
		حفاظت و ایمنی کافی	
انبساط حرارتی مایع مخبوس شده در صورت بسته شدن در هر مکانی از جریان ها	احتمال آسیب به خطوط در اثر فشار بیش تر از حد	شیر ایمنی فشار	حفاظت و ایمنی کافی
		نصب شیر توقف در فشار پایین در مخزن هشدار فشار پایین	
عدم بسته شدن شیر کنترل فشار هنگام تنفس مخازن یا پر شدن مخزن در حین توقف خروجی	خطر فروریختن مخزن در اثر خلاء	تجهیزات نمایش گر خوردگی تزریق بازدارنده خوردگی در بالا دست سیستم توقف جریان گاز و نفت شیر ایمنی جریان	شیر ایمنی دبی جریان روی مخزن تولید در بالای تخلیه مایع خارج از دایک در نظر گرفته شود
		خوردگی، فرسایش، فرسودگی، آسیب به شخصی ثالث	

نتایج آماری انواع موانع و کارایی آن‌ها در تحلیل روش پاپیونی

نتایج آماری حاصل از تعداد موانع مورد استفاده در این مطالعه بر اساس نتایج نرم‌افزار Bow TieXP در جدول ۴ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، در مجموع، ۱۹۳ مورد معادل ۸۲/۸ درصد از موانع پیشگیرانه و کاهنده مربوط به عامل رفتاری بوده است. از

طرفی، سه مورد معادل ۱/۲۹ درصد مربوط به عوامل سخت‌افزار فعال، ۲۰ مورد معادل ۸/۵۸ درصد مربوط به عوامل فنی-اجتماعی، ۱۲ مورد معادل ۵/۱۵ درصد مربوط به عوامل سخت‌افزار پیوسته و پنج مورد معادل ۲/۱۵ درصد نیز مربوط به عوامل سخت‌افزار غیرفعال بوده است. لذا، عوامل رفتاری بیش‌ترین میزان موانع پیشگیرانه و کاهنده را به‌خود اختصاص داده است و اختلاف فاحشی با سایر عوامل دارند.

جدول ۴. گزارش انواع موانع و کارایی آن‌ها در تحلیل روش پاپیونی

گروه موانع در روش پاپیونی	سخت‌افزار غیرفعال	سخت‌افزار پیوسته	فنی-اجتماعی	سخت‌افزار فعال	رفتاری
نفث خام در مخزن / نشت مهارنشده و ناخواسته					
تهدیدها					
سرریز	۰	۴	۳	۲	۴۲
انتشار بخار و گاز	۰	۱	۰	۱	۳۶
خطرات طبیعی	۱	۱	۲	۰	۹
آسیب شخص ثالث یا نیروهای ناخواسته	۰	۲	۱	۰	۱۱
نقص پیوستگی فیزیکی	۱	۱	۰	۰	۲۱
مجموع موانع پیشگیرانه	۲	۹	۶	۳	۱۱۹
درصد موانع پیشگیرانه	۱/۴۴	۶/۴۷	۴/۳۲	۲/۱۶	۸۵/۶
پیامدها					
از دست‌دادن مواد نفتی	۱	۰	۰	۰	۱
حریق و انفجار	۱	۳	۶	۰	۴۵
مرگ‌ومیر و جراحات	۰	۰	۳	۰	۱۲
آلودگی محیط‌زیستی	۱	۰	۱	۰	۱
انتشار موادسمی	۰	۰	۳	۰	۱۲
وقفه در تولید	۰	۰	۲	۰	۳
مجموع موانع کاهنده	۳	۳	۱۴	۰	۷۴
درصد موانع کاهنده	۳/۱۹	۳/۱۹	۱۴/۹	۰	۷۸/۷
مجموع موانع پیشگیرانه و کاهنده	۵	۱۲	۲۰	۳	۱۹۳
درصد موانع پیشگیرانه و کاهنده	۲/۱۵	۵/۱۵	۸/۵۸	۱/۲۹	۸۲/۸

نتایج بررسی مسئولیت‌ها و تعداد آن‌ها در تحلیل پاپیونی

تشخیص و انتخاب، تخصیص منابع، خرید، استفاده و کنترل و پایش موانعی که در این مطالعه انتخاب شده‌اند، هریک بر عهده یک و یا چند واحد متفاوت در شرکت مورد بررسی است. این که هر کدام از واحدهای مرتبط با رویداد مورد بررسی و مسئولین این واحدها رسیدگی به چه تعداد از

موانع مورد استفاده را باید در دستور کار خود قرار دهند، در جدول ۵ آورده شده است.

با استناد به نتایج مندرج در جدول ۵ می‌توان اذعان داشت که بیش‌ترین مسئولیت‌ها به‌ترتیب مربوط به واحدهای مدیر واحد نگهداری و تعمیرات (۸۲ مورد)، مدیر واحد نگهداشت فرآیند (۵۵ مورد) و مدیر عامل (۲۴ مورد) بوده است.

جدول ۵. نتایج بررسی مسئولیت‌ها و تعداد آن‌ها در

تحلیل پایبونی

واحد مربوطه	تعداد مسئولیت‌ها
مدیر عامل	۲۴
مدیر واحد فناوری اطلاعات	۴
مدیر واحد روابط عمومی	۱
مدیر سازمانی	۱
مدیر واحد بحران	۱۱
مدیر واحد ایمنی، بهداشت و محیط زیست	۴
مدیر واحد کنترل کیفیت	۵
مدیر واحد نگهداشت فرآیند	۵۵
مدیر واحد تولید	۲
مدیر واحد حراست	۷
مدیر واحد آموزش	۲۰
مدیر واحد مهندسی فرآیند	۲
مدیر واحد مهندسی	۲۱
مدیر واحد نگهداری و تعمیرات	۸۲
مدیر واحد پشتیبانی	۲۳

بحث

صنعت پتروشیمی یکی از صنایع مهم در توسعه اقتصادی هر کشوری محسوب می‌شود که با انجام فرآیندهای متعدد، فرآورده‌های نفتی و اولیه مورد نیاز سایر صنایع را تأمین می‌کند. این صنایع با موادشیمیایی پرخطر سروکار دارند و در نتیجه، کارمندهای این صنایع با خطرات بهداشتی متعددی مواجه هستند. از دیگر سو، به‌جز نشت موادشیمیایی، سقوط از ارتفاع و لیز خوردن نیز از مهم‌ترین عوامل وقوع حوادث در این صنایع محسوب می‌شوند که این رویدادها می‌تواند با نقص در تجهیزات کنترلی، عدم توجه به دستورالعمل‌ها، عدم رعایت اصول ایمنی و خطای انسانی مرتبط باشند. از این‌رو، عدم توجه و مدیریت صحیح این ریسک‌ها، پیامدهای نامطلوبی را برای سازمان و کارمندا به‌دنبال خواهند داشت و اتخاذ تدابیر مدیریتی مناسب برای کاهش خطرات و پیامدهای نامطلوب ناشی از فعالیت واحدهای پتروشیمی ضروری است (۱۰، ۲۴، ۲۵). صنایع پتروشیمی نقش پر رنگ و حیاتی در کشورمان ایفا می‌کنند،

و با توجه به این‌که سیستم عملیاتی پیوسته و مداومی دارند، وجود هرگونه توقف و نقص در فرآیند آن باعث بروز اختلال‌هایی می‌شود که ممکن است به خسارت‌های جبران‌ناپذیری اعم از خسارت‌های جانی، مالی، محیط‌زیستی و نظایر آن منجر شود. به‌همین دلیل، اقدامات زیادی در زمینه‌ی ارتقای ایمنی این صنایع باید انجام گیرد که در این راستا یکی از مهم‌ترین اقدامات ارزیابی و تحلیل ریسک محیط کاری است.

در صنعت پتروشیمی، ارزیابی ریسک تکنیکی برای تجزیه-وتحلیل آینده‌نگر و سیستماتیک احتمال و شدت عواقب یک تصادف است و هدف نهایی ارزیابی ریسک ارائه‌ی پیش‌بینی‌های ایمنی و قضاوت در مورد قابل‌قبول بودن ریسک فعلی است تا به مدیران در تصمیم‌گیری منطقی در مورد کنترل ریسک کمک کند (۱۱). بدیهی است که اگر سطح ریسک بیش‌تر از حد مجاز باشد، باید تلاش کرد تا با افزودن اقدامات ایمنی، سطح ریسک را کاهش داد تا زمانی که ریسک باقی‌مانده قابل‌قبول شود (۲۶). در این خصوص، ارزیابی کمی ریسک^۱ نقش مهمی در همه‌ی جنبه‌های چرخه کامل فرآیند پتروشیمی ایفا می‌کند (۲۷).

ثابت شده است که روش پایبونی می‌تواند برای ارزیابی پیامدهای محیط‌زیستی به‌ویژه در مراحل طراحی، راه‌اندازی پروژه، بررسی تغییرات و وقایع جدید و عملیات راه‌اندازی مناسب باشد (۲۸). روش پایبونی به ارزیاب این امکان را می‌دهد که به‌وضوح بین موانع پیش‌گیرانه و حفاظتی تمایز قائل شود. از طرفی، این روش به اولویت‌بندی اقدامات ایمنی نیز کمک می‌کند. امروزه، روش پایبونی برای کاربرد در صنایع پیشرفته و برای ارزیابی احتمالی خطرات حوادث صنعتی بزرگ توسعه داده شده است، و مانند بسیاری از روش‌های ارزیابی دیگر، استفاده از آن به‌سرعت در حال گسترش به حوزه‌ی ایمنی شغلی است (۲۹). از این‌رو، پژوهش حاضر نیز با هدف ارزیابی ریسک حوادث مخازن حاوی مواد اشتعال‌زا در پتروشیمی شیراز با استفاده از روش پایبونی انجام شد.

نتایج نشان داد که از مجموع ۲۳۳ مورد موانع پیشگیرانه و کاهنده، ۱۹۳ مورد معادل ۸۲/۸ درصد مربوط به عامل رفتاری بوده است. سه مورد معادل ۱/۲۹ درصد مربوط به عوامل سخت‌افزار فعال، ۲۰ مورد معادل ۸/۵۸ درصد مربوط

^۱ Quantitative Risk Assessment (QRA)

به عوامل فنی-اجتماعی، ۱۲ مورد معادل ۵/۱۵ درصد مربوط به عوامل سخت‌افزار پیوسته و پنج مورد معادل ۲/۱۵ درصد نیز مربوط به عوامل سخت‌افزار غیرفعال بوده است. لذا، عوامل رفتاری (انسانی) بیش‌ترین سهم موانع پیشگیرانه و کاهنده را به‌خود اختصاص داده و اختلاف فاحشی با سایر عوامل دارند. با توجه به نتایج تحقیق در خصوص اهمیت و تعداد موانع رفتاری (مرتبط با منابع انسانی) در افزایش سطح ایمنی فرآیند صنعت پتروشیمی و بازگشت‌پذیری منابع و سرمایه‌گذاری در بخش آموزش ایمنی به کارکنان، می‌توان اذعان داشت که افزایش آگاهی نیروی انسانی شاغل در واحدهای مربوطه، می‌تواند راهکار مناسبی برای مدیران در راستای ارتقای افزایش سطح ایمنی این بخش‌ها باشد. این موضوع موید لزوم تغییر و ارتقای نگرش، اصلاح ساختار و برنامه‌ریزی آموزش‌های اثربخش و موثر در این حوزه است که هزینه‌های مستقیم بالایی نیز در پی نداشته و در عین‌حال از احتمال بازگشت سرمایه‌ی خوبی برخوردارند. در این خصوص، میهن‌پرست (۲۰۲۱) با بررسی اهمیت پیاده‌سازی الزامات مدیریت ایمنی فرآیند در صنایع نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی، هم‌سو با نتایج تحقیق حاضر گزارش کرد که عوامل رفتاری از قبیل مشارکت کارمندان در تصمیم‌گیری مدیریت ایمنی فرآیند و آموزش به آن‌ها می‌تواند راهکار مهمی در پیاده‌سازی الزامات مدیریت ایمنی فرآیند در این صنایع باشد (۱). زی و همکاران (۲۰۲۱) با در نظر گرفتن حوادث فاجعه‌بار آتش‌سوزی و انفجار در صنایع پتروشیمی، یک روش ارزیابی ریسک بر اساس مدل پایبونی برای شناسایی دقیق و کارآمد حلقه‌های ضعیف سیستم ایمنی ایجاد کردند (۳۰). عبادزاده و همکاران (۲۰۲۳) با تلفیق روش‌های پایبونی و EFMEA در ارزیابی ریسک محیط‌زیستی صنایع پتروشیمی گزارش کردند که مزیت استفاده از روش پایبونی در مدیریت ریسک صنایع پتروشیمی، سادگی، کاربردی بودن، کم‌هزینه بودن اجرا و هم‌چنین قابل درک بودن آن است (۱۰). وو و همکاران (۲۰۲۳) نیز با استفاده از تحلیل پایبونی و روش تحلیل شبکه بیزی نسبت به ارزیابی ریسک پتروشیمی آرامیس اقدام کرده و نتیجه گرفتند که روش پایبونی می‌تواند به مدیران در شناسایی موانع ایمنی که نقش کلیدی در خطرات حوادث مختلف بازی می‌کنند، کمک کرده و پشتیبانی مؤثری برای تصمیم‌گیری مدیریت ریسک و اجرای راهبردهای پیشگیرانه ارائه کند (۱۱). از

دیگر سو، سانگ و همکاران (۲۰۱۶) و استفانا و همکاران (۲۰۲۲) با طراحی یک چارچوب تجزیه و تحلیل ریسک سیستماتیک بر اساس مدل پایبونی نسبت به ارزیابی حوادث شغلی مرتبط با ایمنی فرآیند اقدام کردند (۳۱، ۳۲). شریعتمداری و نه‌اوندی (۲۰۲۰) هرچند روش تصمیم‌گیری چندمعیاره را به‌دلیل قابلیت ارزیابی، رتبه‌بندی و ارزیابی سطح شناخت ریسک‌های شناسایی شده، روشی کارآمد در شناسایی و ارزیابی ریسک‌های صنایع پتروشیمی معرفی کردند؛ اما، اذعان داشتند که این روش برخلاف روش پایبونی نمی‌تواند اقدامات لازم برای مقابله با ریسک‌های شناسایی‌شده را ارائه و سطح ریسک‌ها را دسته‌بندی و ارزیابی کند (۱۳). کریمی و همکاران (۲۰۱۹) نسبت به ارزیابی خطاهای انسانی مربوط به بردمن در یکی از اتاق‌های کنترل صنایع پتروشیمی اقدام کرده و نتیجه گرفتند که بیش‌ترین سبک کنترلی برای بردمن و بردمن ارشد به‌دست آمده از شبکه بیزین مربوط به کنترل راهبردی و اتفاقی با احتمال خطای انسانی به‌ترتیب برابر با ۰/۱۳۶ و ۰/۱۷۱ بوده است (۱۴). این در حالی است که در پژوهش حاضر سعی شد علاوه بر خطاهای ناشی از عوامل انسانی (رفتاری)، سایر عوامل از قبیل عوامل سخت‌افزار فعال، عوامل فنی-اجتماعی، عوامل سخت‌افزار پیوسته و عوامل سخت‌افزار غیرفعال نیز مورد ارزیابی قرار گیرند. بالیست و همکاران (۲۰۱۸) با تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تجزیه‌وتحلیل حالات شکست محیط‌زیستی نسبت به ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی واحد بهره‌برداری پالایشگاه نفت خام گچساران اقدام کرده و نتیجه گرفتند که مهم‌ترین ریسک‌ها شامل آلاینده‌های خروجی از دودکش‌ها و بار اضافی منتقل به مشعل بوده است (۱۵). به‌علاوه، حلوانی و همکاران (۲۰۱۷) نیز با ارزیابی ریسک خطاهای انسانی در اتاق کنترل شرکت پالایش گاز پارس‌یان شهرستان مَهر نتیجه گرفتند که مشهودترین خطاهایی که در اتاق کنترل شرکت رخ داده است، مربوط به خطای عملکردی و بازدید بوده است (۱۶). از دیگر سو، یوو همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از تحلیل پایبونی و روش تحلیل شبکه بیزی نسبت به ارزیابی ریسک پویا در صنعت پتروشیمی اقدام و گزارش کردند که نه فقط ارزیابی دینامیکی سطح ریسک برای موانع ایمنی در حالت‌های مختلف قابل اجرا است؛ بلکه، هم‌چنین می‌توان قضاوت کرد که آیا قابلیت حفاظت ایمنی کلی فعلی سیستم کافی است

یا خیر (۱۸). سایساندهیا و و ویجی بابو (۲۰۲۰) نیز با شناسایی و ارزیابی ریسک در صنعت پتروشیمی نتیجه گرفتند که شناسایی ریسک در صنعت پتروشیمی برای سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری بسیار مهم بوده و می‌تواند به کاهش هزینه عملیاتی صنعت پتروشیمی منجر شود (۲). این در حالی است که لی و همکاران (۲۰۱۶) با مطالعه‌ی صنایع شیمیایی در کره جنوبی به این نتیجه رسیدند که بیش‌تر حوادث با کمبود آموزش مؤثر و مناسب کارورها، کمبود آگاهی و فرهنگ ایمنی و سیستم‌های مدیریتی و دستورالعمل‌ها و اقدامات اصلاحی ایمنی ناکافی مرتبط بوده است و پیاده‌سازی روش پایبونی می‌تواند به کاهش حوادث فرآیندی، مستندسازی سیستماتیک توسعه فناوری فرآیند، کاهش خطاهای بهره‌برداری، افزایش کیفیت و بهره‌وری، کاهش حق بیمه پرداختی و در نهایت ایجاد سیستم خودکار مدیریت ایمنی فرآیند منجر شود (۱۹).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش آگاهی نیروی انسانی شاغل در واحدهای مختلف پتروشیمی شیراز می‌تواند به افزایش سطح ایمنی فرآیند منجر شود و لذا، مدیران با سرمایه‌گذاری در بخش آموزش ایمنی به کارکنان می‌توانند سطح ایمنی در صنعت پتروشیمی را ارتقا دهند. این مهم موید لزوم تغییر و ارتقای نگرش، اصلاح ساختار و برنامه‌ریزی آموزش‌های اثربخش و مؤثر در این حوزه است که ضمن عدم تحمیل هزینه‌های قابل توجه، در عین حال از شانس بازگشت سرمایه خوبی نیز برخوردار است. از آنجا که اجرای این پژوهش با محدودیت‌های زمانی و مالی مواجه بود؛ لذا، برای ارتقای سطح ایمنی کارکنان در صنایع پتروشیمی از طریق کاهش ریسک محیط کاری، نسبت به استفاده از سایر روش‌ها از جمله پردازش ایمنی و خطرات شغلی و همچنین تحلیل سلسله مراتبی و تحلیل شبکه برای ارزیابی و تحلیل ریسک محیط کاری، رتبه‌بندی و اولویت‌بندی ریسک‌ها و موانع شناسایی شده، اعمال سیاست‌های تشویقی از قبیل اختصاص پاداش و تسهیلات به کارکنان به منظور افزایش انگیزه آن‌ها در اجرای اثربخش دستورالعمل‌های ایمنی و همچنین، مدت‌توجه قرار دادن توانایی کارکنان شرکت برای ارتقای اثربخشی آموزش‌ها و اعمال دستورالعمل‌ها و استانداردهای ایمنی توصیه می‌شود. به‌طور کلی، هرچند که ارزیابی رابطه بین موانع

پیش‌گیرانه در برابر وقوع و کاهش تهدیدات در به حداقل رساندن پیامدها از یک‌سو و به‌علاوه، شناسایی کمبودهای پروژه و پیشنهاد اجرای اقداماتی برای رفع آن‌ها از نقاط قوت روش پایبونی است، ولی وجود محدودیت‌هایی از نظر پویایی، قابلیت اطمینان و فراوانی رویدادهای مورد استفاده در مدل که به‌طور معمول بر قضاوت افراد خبره و داده‌های تجربی استوار است، به افزایش عدم قطعیت در برون‌دادهای منجر می‌شود. از طرفی، مدل پایبونی نمی‌تواند دینامیک سیستم را ثبت کرده و وابستگی‌های متقابل پیچیده بین عوامل خطر را برآورد کند. لذا، به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و مؤثرتر و ارزیابی ریسک پویا، ترکیب مدل پایبونی با سایر روش‌های ارزیابی ریسک از جمله رویکرد شبکه بیزی پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی: بدین وسیله از معاونت پژوهش و فناوری واحد الکترونیکی دانشگاه آزاد اسلامی که در اجرای این پژوهش ما را یاری کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود. **تعارض منافع:** نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی: این پژوهش فاقد حامی مالی بوده و با هزینه شخصی نویسندگان انجام یافته است.

ملاحظات اخلاقی: این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد با عنوان "ارزیابی و تحلیل ریسک محیط کاری در پتروشیمی شیراز با استفاده از روش بوتای" مصوب واحد الکترونیکی دانشگاه آزاد اسلامی با کد ۵۰۳۳۲۹۲۰۰۶۹۰۷۶۴۲۱۰۰۲۶۱۶۲۸۴۴۰۲۲ است. نویسندگان همه‌ی نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین، هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تاثیر بگذارد را رد می‌کنند.

سهم نویسندگان: تمام نویسندگان به طور یکسان در اجرا و انجام تحقیق مشارکت داشته‌اند و پژوهش حاضر را مطالعه و تأیید نمودند.

References

1. Mihanparast H. Importance of implementing process safety management requirements; PSM, in oil, gas, refining and petrochemical industries. Proceedings of the 7th International Conference on Chemical and Petroleum Engineering. 2021 Jun. 17, Tehran, Iran (In Persian).
<https://doi.org/10.1201/9781003129257-2-2>
2. Saisandhiya NR, Vijay Babu K. Hazard identification and risk assessment in petrochemical industry. *Int J Res Appl Sci Eng Technol* 2020; 8(9): 778-83.
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2020.31583>
3. Pérez FI. Writing 'usable' Nuclear Power Plant (NPP) safety cases using bowtie methodology. *Proc Saf Environ Prot* 2021; 149: 850-7.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.022>
4. Azhdari MR, Monazami Tehrani G, Alibabaei A. Investigating the causes of human error-induced incidents in the maintenance operations of petrochemical industry by using HFACS. *J Occup Hyg Eng* 2017; 3(4): 22-30 (In Persian). <https://doi.org/10.21859/johe-03043>
5. Azarnia Ghavam M, Mazloumi A, Hosseini MR. Identification and evaluation of human error in operation of electrical installations of Tehran Province Electricity Distribution Company using SHERPA technique. *J Health Saf Work* 2019; 9(4): 363-80 (In Persian).
6. Jafari B, Nezamodini ZA, Sari H, Hesam S. Risk assessment by Job safety analysis and William Fine Method and comparison with workers' risk perception results. *Arch Occup Health* 2021; 5(4): 1109-17.
<https://doi.org/10.18502/aoh.v5i4.7972>
7. Welch SA, Moe SJ, Sharikabad MN, Tollefsen KE, Olsen K, Grung M. Predicting environmental risks of pharmaceuticals from wholesale data: An example from Norway. *Environ Toxicol Chem* 2023; 42(10): 2253-70.
<https://doi.org/10.1002/etc.5702>
8. Kirwan B, Mearns K, Reader TW, Jackson J, Kennedy R, Gordon R. Development of a methodology for understanding and enhancing safety culture in Air Trac Management. *Saf Sci* 2013; 53: 123-33.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.09.001>
9. Bhatt S. Occupational risk assessment using Bow tie Method in chemical industry. *Int J Res Appl Sci Eng Technol* 2024; 12(6): 944-52.
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.63230>
10. Ebadzadeh F, Monavari SM, Jozi SA, Robati M, Rahimi R. Combining the Bow-tie model and EFMEA method for environmental risk assessment in the petrochemical industry. *Int J Environ Sci Technol* 2023; 20: 1357-68.
<https://doi.org/10.1007/s13762-022-04690-y>
11. Wu X, Huang H, Xie J, Lu M, Wang S, Li W, et al. A novel dynamic risk assessment method for the petrochemical industry using bow-tie analysis and Bayesian network analysis method based on the methodological framework of ARAMIS project. *Reliab Eng Sys Saf* 2023; 237: 109397.
<https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109397>
12. Zolfaghari G, Omrani F, Alizadeh A. Semi-quantitative risk assessment of health exposure to volatile organic carbons (VOCs) in Sabzevar petrol stations. *J Environ Sci Stud* 2023; 9(2): 8549-60 (In Persian).
13. Shariatmadari M, Nahavandi N. Identification and assessment of risks in petrochemical projects in Iran; case study: Bakhtar Petrochemical Company. *J Struct Constr Eng* 2020; 7: 101-23 (In Persian).
14. Karimie S, Mohammadfam I, Mirzaei Aliabadi M. Human errors assessment in the one of the control rooms of a petrochemical industrial company using the extended CREAM method and BN. *J Health Saf Work* 2019; 9(2): 105-12 (In Persian).
15. Balist J, Malek mohammadi B, Chehrzar F, Moarab Y. Environmental risk assessment of Gachsaran oil refinery production unit by Integrating Multi Criteria Decision Making and Environmental Failure-Mode and effects analysis. *J Environ Sci Technol* 2018; 20(1): 165-78 (In Persian).
16. Halvani G, Mehrparvar AH, Shamsi F, Rafieenia R, Khani Mouseloo B, Ebrahimi G. Risk assessment of human error among Mohr City, Parsian Gas refinery company control room operators using systematic human error reduction and prediction approach SHERPA in 2016. *Tibbi-i-Kar*. 2017; 9(3): 32-44 (In Persian).
17. Rezaian S, Jozi SA, Zeynali H. Safety and environmental risk assessment of northwest petrochemical company using EFMEA method. Proceedings of the International Conference on the New Horizons in the Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment. 2017 Dec. 14, Tehran, Iran (In Persian).
18. Yoo H, Yang M, Song J, Yoon J, Lee W, Jang J, et al. Investigation of working conditions and health status in platform workers

in the Republic of Korea. *Saf Health Work* 2024; 15(1): 17-23.
<https://doi.org/10.1016/j.shaw.2024.01.002>

19. Lee K, Kwon H, Cho S, Kim J, Moon I. Improvements of safety management system in Korean chemical industry after a large chemical accident. *J Loss Prevent Proc Ind* 2016; 42: 6-13. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.08.006>

20. Ghaedsharaf Z, Jabbari M. Identifying hazards and presenting HSE risk management program using Bow-Tie and SOWT-ANP methods at the urea unit of Shiraz petrochemical complex. *J Health Saf Work* 2020; 10(1): 46-57 (In Persian).

21. Ahmadi A, Amiri F, Tabatabaie T. Investigation of health, environmental and economic effects of air pollution from Shiraz Petrochemical Complex (Case study: Marvdasht city and historical site of Persepolis). *Geogr (Reg Plan) J* 2023; 13: 1-10 (In Persian).

22. Pérez FI. Writing 'usable' Nuclear Power Plant NPP safety cases using bowtie methodology. *Proc Saf Environ Prot* 2021; 149: 50-7.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.022>

23. Bensaci C, Zennir Y, Pomorski D, Innal F, Liu Y, Tolba C. STPA and Bowtie risk analysis study for centralized and hierarchical control architectures comparison. *Alexandria Eng J* 2020; 595: 3799-3816.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.06.036>

24. Moradi B, Jazani RK, Gheisvandi H, Monazami Tehran G. Risks management of Tube Bundle heat exchanger in the petrochemical industries using the Risk-Based Inspection approach. *J Health Field* 2019; 7(1): 36-43.

25. Majidi E, Zarei Mahmoud Abadi H, Fattahi Bafghi H, Ahmadi S, Sharifi M, Moradi B. Identifying and assessment the health hazards of the petrochemical industry using the localized

JHA Method. *Occup Hyg Health Promot J* 2022; 5(4): 359-70 (In Persian).
<https://doi.org/10.18502/ohhp.v5i4.8462>

26. Langdalen H, Abrahamsen EB, Selvik JT. On the importance of systems thinking when using the ALARP principle for risk management. *Reliab Eng Sys Saf* 2020; 204: 107222.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107222>

27. Shariff AM, Zaini D. Inherent risk assessment methodology in preliminary design stage: a case study for toxic release. *J Loss Prevent Proc Ind* 2013; 26: 605-13.

28. Jones FV, Israni K. Environmental risk assessment utilizing Bow-tie methodology. *Proceedings of the International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production*, 2010 Apr. 12-14, Perth, Australia.
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.12.003>

29. Jacinto C, Silva C. A semi-quantitative assessment of occupational risks using bow-tie representation. *Safety Science*. 2010;48(8):973-9.

30. Xie S, Dong S, Chen Y, Peng Y, Li X. A novel risk evaluation method for fire and explosion accidents in oil depots using bow-tie analysis and risk matrix analysis method based on cloud model theory. *Reliab Eng Sys Saf* 2021; 215: 107791.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107791>

31. Song G, Khan F, Wang H, Leighton S, Yuan Z, Liu H. Dynamic occupational risk model for offshore operations in harsh environments. *Reliab Eng Sys Saf* 2016; 150: 58-64.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.01.021>

32. Stefana E, Ustolin F, Paltrinieri N. IMPROSafety: a risk-based framework to integrate occupational and process safety. *J Loss Prevent Proc Ind* 2022; 75: 104698.
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104698>